

# 都道府県別水需要モデルの 構築に関する基礎的研究

大西 暁生<sup>1</sup>・佐藤 嘉展<sup>2</sup>・奥岡 桂次郎<sup>3</sup>・石 峰<sup>4</sup>・森杉 雅史<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 富山県立大学講師 工学部環境工学科 (〒939-0398富山県射水市黒河5180)

E-mail: akio123@pu-toyama.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 京都大学特定准教授 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>学生会員 名古屋大学JSPS特別研究員DC-1 大学院環境学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中千種区不老町)

<sup>4</sup>正会員 名古屋大学研究員 大学院環境学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中千種区不老町)

<sup>5</sup>正会員 名城大学准教授 都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)

本研究では、各都道府県を対象に将来のセクター別（農業用水、工業用水、生活用水）の水需要を推計するシミュレーションモデルを構築した。このモデルは、統計や地理情報システムのデータを利用することによって構築されており、将来の社会経済の状況や節水等の対策をシナリオとして扱うことで2000年から2050年までの水需要を5年間隔で推計できる。得られた結果として、人口動態や経済成長の具合、また耕地面積の変動や水道の普及率、工業部門における回収水等のセクターごとの対策や原単位の推移をもとに、各セクターの用水量がシナリオ別に推計された。一例として、現状の傾向を最も反映したBAUシナリオでは、日本全体の全用水量が2000年の824.19億 $m^3$ から2050年には543.95億 $m^3$ と減少することが分かった。将来の水需要を知ることによって、今後、水資源が不安定となるような水不足が発生した場合の適切な水利用のあり方を模索することができると同時に、河川の流出に与える影響を検討することができる。

**Key Words :** Water demand model, Prefecture, Sector, Future estimation

## 1. はじめに

水は循環し、生態系の維持や水辺とその周辺環境の保全、水質の浄化と改善等の機能を果たすとともに、我々人間の生活や産業の営みを支える重要な水資源を提供してくれる。しかしながら、高度経済成長期には大都市圏を中心に慢性的な水不足が発生し、さらに生活や産業の活動に伴う排水等によって水質汚濁が各地域で問題となった。そのため、水資源開発の積極的な推進と水質汚濁に対する多くの規制が進められ、さらには住民の水辺やその周辺環境に対する意識の向上から、水に関わる問題は徐々に解決されていった。こうした歴史的な背景を受け、現在では、水の利用と環境が調和した新たな社会の構築が急がれている。ただし、近年では降水量の低下や異常気象の頻発等、気候の変動が指摘されており、これは自然の生態系や我々の生活を脅かす大きな問題となっている。本年も、梅雨の時期に九州を中心とした地域で、経験したことのない豪雨と河川の氾濫が相次いだ一方で、平成6年には厳しい渇水が発生し、少雨と高温等により多くの河川において被害が頻発し、同時に取水制限が実

施される等、少雨化や少雪化、さらに降水量の変動幅の増大は安定的な水供給における大きな足枷となっている。また、高度経済成長期に整備された多くの水資源施設で進む老朽化、大規模地震の発生等に伴い被災を受けた施設の水供給の機能低下への対応や、安全でおいしい水や豊かな環境を望む国民の期待への対応等、水資源に関する多くの課題に対して十分に対応しきれていない<sup>1)</sup>。

このような背景を受け、都道府県における将来の水需給の見通しや供給の計画等、水資源に関する長期計画が示されており、2006年3月末時点で32の都道府県において策定されている<sup>2)</sup>。さらに、多田・土屋<sup>3)</sup>は全国の水共同域単位において全国の水需給バランスを推計し渇水リスクを評価した。地域的な検討として、大坂谷・青山<sup>4)</sup>はシステムダイナミックスモデルを用いて1960年～2000年における都市成長と水需給の関連を札幌市と福岡市を対象に行っている。また、勝谷<sup>5)</sup>は愛媛県松山市を対象にこの自治体における長期水需給計画の策定について説明し水資源対策の方向性を示した。上記のような既存研究があるものの、将来の水需要を社会経済状況を加味しこれをシナリオとして扱った研究が少ないこと、ま

た全都道府県を網羅した研究がさほどないことから、本研究ではこれらを考慮し検討する。具体的には、全都道府県を対象に将来の社会経済状況を加味しながら、セクター別（農業用水、工業用水、生活用水）の水需要を推計するシミュレーションモデルを構築する。ただし本来なら、水利用や水資源を扱う場合、その集水域や取水域といった自然流域圏ないしは人為的な影響圏、すなわち流域や多田・土屋<sup>3)</sup>のような水共同域を対象にするのが望ましい。しかし、現時点では人間の諸活動を表わす統計データ等をすべてこのような流域や水共同域単位で収集・整理することは難しく、まずはデータの入手可能な県の行政単位を設定することで、基礎的な分析フレームを確立する。このモデルは、一般に入手できる統計データや地理情報システム（GIS：geographic information system）のデータを利用することによって構築されており、将来の社会経済の状況や節水等の対策をシナリオとして扱うことで2000年から2050年までの水需要を5年間隔で推計する。ここで、5年間隔で推計する理由は、将来人口を推計するために必要なデータが5歳階級別であったこと、またこれを用いて推計する手法がコーホート要因法であることからである。最終的には、人口動態や経済成長、また耕地面積の動向や水道の普及状況、回収水の導入等といったセクターごとの対策と原単位の推移等をもとに、将来の用水量の（平均的な）推移と、最大と最小の需要量を推計する。こうした将来の水需要を知ることによって、今後、水資源が不安定となるような例えば渇水や水不足が発生した場合の適切な水利用のあり方を模索することができると同時に、河川の流出に与える影響を検討することができる。まずは、こうした検討を進めていくための基礎的な資料を整理することを目的に、全都道府県を対象に水需要を推計できるシミュレーションモデルを構築する。

## 2. 水需要モデルの構築

ここでは、全都道府県を対象に、将来の水需要量をセクターごとに推計するシミュレーションモデルを構築する。セクター別の水需要量は、「日本の水資源」<sup>1)</sup>等を参考に、農業用水、工業用水、生活用水の3つを設定する。ただし、例えば工業用水の一部には海水が利用されているものの、本研究では最終的に河川への影響を考察するため、これを除外している。構築するモデルは、人口動態および県内総生産を基本的な駆動力とし、産業構造変化や土地利用変化（とりわけ耕地面積の変化）等を簡便に推計することで、各セクターの水需要量を求める。また、各セクターの水需要量の推計は、現状と同じような傾向が今後も継続するものとする自然体ケース

（BAU：Business as usual）をベースラインとしながらも、様々なシナリオを設定することによって、水需要の増減を最大と最小の需要量の幅として推計する。これによって、過去の実績をもとに、将来想定される変化や動向をモデル内で表わすことができ、最終的にはこの想定下における水需要量を算出することができる。

なお、本研究の人口、県内総生産、産業構造等の推計方法は大西<sup>7)10)</sup>と同様の手法を用いており、推計結果もこれに従っている。

### (1) 人口の推計

人口の推計は、平成12年の国勢調査<sup>11)</sup>の全都道府県別・男女5歳階級別人口を用い、コーホート要因法によって2050年までの人口を推計する<sup>9)10)</sup>。ここで、コーホート要因法を用いて人口を推計するには、合成特殊出生率（以下、出生率とのみ略する）、死亡率（もしくは生存率）、男女出生比、男女別5歳階級別純移動率の情報が必要である<sup>9)10)</sup>。全都道府県別且つ設定したシナリオ別の出生率は次のようである<sup>9)10)</sup>。まず、BAUの出生率については、平成13年度人口動態統計特殊報告<sup>12)</sup>の出産可能年齢別の出生率をもとに推計した<sup>9)10)</sup>。これ以外にも、データ入手の有無と出生率の増減を勘案し、出生率が昭和22年以降で最も少ない2005年レベル（全国平均値1.26）<sup>13)14)</sup>や、他方で出生率が向上する1990年レベル（全国平均値1.54）<sup>12)</sup>をシナリオとして設定した<sup>9)10)</sup>。死亡率については、第20回生命表<sup>15)</sup>を用いる<sup>9)10)</sup>。男女出生比については、平成18年10月～19年9月の全都道府県、男女別出生児数及び死亡者数<sup>16)</sup>から推計し用いる<sup>9)10)</sup>。男女別5歳階級別純移動率については、平成12年国勢調査と平成17年国勢調査<sup>17)</sup>および第20回生命表から人口の自然増数と社会増加数を求め、その差分から推計している<sup>9)10)</sup>。

### (2) 県内総生産の推計

全都道府県の総生産値は、県民経済計算<sup>18)</sup>の2000年の値（実質：平成12年連鎖価格）を用い、その将来の成長率は設定するシナリオごとに変えた<sup>9)10)</sup>。産業（第1次、第2次、第3次の産業）ごとの総生産並びにその割合も同様の出所の統計を用いている<sup>9)10)</sup>。一人あたり県内総生産は、県内総生産を前節で推計した全都道府県別の人口で除したものである<sup>9)10)</sup>。

### (3) 産業構造の推計

産業構造の変化は、産業構造を各産業の比率によって表わし、国際協力銀行<sup>19)</sup>や大西ら<sup>7)10)20)</sup>等の研究を参考に、ロジスティック関数によって得られた推定式を、全都道府県に適用する<sup>9)10)</sup>。使用したデータは、1990年から2007年の日本全体の値<sup>18)</sup>である<sup>9)10)</sup>。推計の結果から、第1次と第3次の産業については第2次産業より相関が高か

ったため、第1次と第3次の産業の比率を求めてから、その後全体から差し引くことによって第2次産業の比率を求める<sup>9,10</sup>。第1次産業の相関係数は0.84であり、第3次産業のそれは0.73であった<sup>9,10</sup>。産業比率は、シナリオごとに設定・推計する人口と県内総生産の変化に従い、それぞれ期間ごとに異なった値が算出される<sup>9,10</sup>。

#### (4) 農業用水量の推計

農業用水量は水稲の生育に必要な水田かんがい用水、野菜・果樹等の生育等に用いる畑地かんがい用水、牛、豚、鶏等の家畜飼育等に使用する畜産用水に大別される<sup>1)</sup>。これら用水量は用途や水消費も異なることから、個別に推計することが望ましいが、ここではデータ入手等の問題から用途ごとの推計は行わず、農業用水量全体を対象に推計する。日本全体の農業用水量は、水を最も消費する水田かんがい用水がおよそ9割以上を占めており、畑地かんがい用水の割合も1975年の1.23%から2008年の5.13%と徐々に伸びてきている。ただし、日本全体の傾向を見ると、近年、農業用水量は1975年の570億 $m^3$ から2008年546億 $m^3$ と減少傾向にあり、特に水田かんがい用水は同期間において560億 $m^3$ から514億 $m^3$ と減少しており、こうした原因として水田の耕地面積の低下が起因している。日本全体の耕地面積は、前述したように、1970年の5,796千haから2010年の4,592千haと減少し、とりわけ水田の耕地面積は同期間において3,415千haから2,496千haと大幅に低下している。日本全体の農業用水原単位（単位耕地面積当たりの農業用水量）は、1975年の10,229.72 $m^3/ha$ 、1980年の10,620.77  $m^3/ha$ から1999年以降は11,894.00  $m^3/ha$ と1万1千 $m^3/ha$ の後半を2008年まで維持し続けている。ただし、1975年と1980年から1999年の増加については、例えば農業用水量の推計が農林水産省から国土交通省水資源部に移行される等しており、実際に増加したかは今後検討が必要である。

本研究では、得られたデータの制約のもと、式(1)、(2)のように各県の農業用水量を簡便に推計する。

$$AW_i = CA_i \times \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \alpha \cdot PPA_i + \beta \quad (2)$$

AW：農業用水量，CA：耕地面積， $\varepsilon$ ：農業用水原単位，PPA：田面積割合， $\alpha$ ， $\beta$ ：推定すべきパラメータ， $i$ ：県

耕地面積は国土数値情報土地利用3次メッシュデータ<sup>20)</sup>の田<sub>(付録1)</sub>とその他の農用地<sub>(付録2)</sub>の合計を用いる。また、田面積割合とは耕地面積に対する田面積の割合を意味する。農業用水原単位は「日本の水資源」<sup>1)</sup>に示されてい

る2008年の各都道府県の農業用水量を耕地面積で除したものである。農業用水原単位は、例えば田面積割合が増加した場合、原単位が上昇し、耕地面積が一定であっても用水量が増える構造となっている。ただし本来なら、農業用水原単位は作付種だけではなく、気温や降水といった気象条件、さらに土壌や水はけといった土地の具合等によって決まるものであるが、現時点では顕著な関係が得られなかったため、作付種のみを考慮して推定する。

ここで将来の耕地面積がどのように変化するかを考えるため、国土数値情報土地利用3次メッシュデータ<sup>20)</sup>の各土地利用面積（田，その他の農用地，森林，荒地，建物用地，幹線交通用地，その他の用地，河川地及び湖沼，海浜，海水域，ゴルフ場）の内、人為的な土地利用である田，その他の農用地，幹線交通用地，その他の用地，ゴルフ場においては人口の増減に伴い変化するものと仮定した。建物用地面積については、都市計画において様々な再編が考えられており、コンパクトシティもその一つである。そのため、ここでは複数のシナリオが考えられる。一つ目は、現状と同じ面積を保つパターンであり、例えば人口が減少すれば、建物用地における人口密度は低下していくため、歯抜け状態に建物が残っていくパターンである。二つ目は、人口密度が変わらないパターンであり、この場合例えば人口が減少すれば、それに伴い建物用地も縮小していき、余剰の面積が発生することになる。この余剰の面積は、将来的に他の土地利用に活用される可能性が高い。三つ目は、人口密度（建物用地面積に対する人口）を2050年には現在より2倍高くし、人々が集中して居住するコンパクトシティを想定した社会である<sup>9,10</sup>。これは、2000年の全都道府県の平均が5,966人/ $km^2$ であるのに対して、2050年には11,932人/ $km^2$ となり、例えば現在の東京都の人口密度（15,101人/ $km^2$ ）に埼玉県、千葉県、愛知県等が匹敵するようになる<sup>9,10</sup>。また、これも二つ目と同様に、余剰となる面積が大幅に発生することになる。

ここでは、発生する余剰面積の半分を耕地面積に転用するシナリオを設定し、さらにはこれを水田に置き換えることと仮定する。ただし、こうした余剰の土地は本来、様々な用途に転用することが可能であり、その転用の程度もまた社会経済の状況によって変わる。さらには仮に耕地に転用された場合でも、食料需要や政策等の影響を受けて、その作付けが変更される可能性があり、ここではあえて農業用水の需要が増加するようなシナリオを設定することでその最大値として設定した。

#### (5) 工業用水量の推計

工業用水量<sub>(付録3)</sub>は、淡水と海水の使用に分けられ、淡水使用量は新たに取水する淡水補給量（取水量ベース<sub>(付録4)</sub>）と一度使用した水を再利用する回収水に分けられ

る。回収率とは、淡水使用量に対する回収水の割合のことであり、これが高いほど有効に水が使用されていることを意味している。また、工業用水量は業種別で見ると、化学工業、鉄鋼業、パルプ・紙・紙加工品製造業の3業種が用水多消費3業種と呼ばれ、用水量の大半を占めていることから、これらの業種の動向が工業用水量全体に大きく影響を与える。ここでは、工業のグループ分類を基礎資材型グループ、加工組立型グループ、生活関連型グループの3つに大別する。上記の用水多消費業種である化学工業と鉄鋼業は基礎資材型グループに、パルプ・紙・紙加工品製造業は生活関連型グループに含まれる。

日本全体の工業用水の淡水使用量（従業者30人以上の事務所についての数値）は、第2次産業とりわけ製造業の業績と密接に関係しており、1965年の工業用水の淡水使用量179億 $m^3$ （内訳：回収水65億 $m^3$ 、淡水補給量114億 $m^3$ ）が昭和50年代前半（1975年）には444億 $m^3$ （内訳：回収水297億 $m^3$ 、淡水補給量147億 $m^3$ ）まで急激に増加し、その後、昭和50年代中頃（1985年）には501億 $m^3$ （内訳：回収水374億 $m^3$ 、淡水補給量127億 $m^3$ ）と微増に留まり、2000年には555億 $m^3$ （内訳：回収水436億 $m^3$ 、淡水補給量119億 $m^3$ ）、2008年には509億 $m^3$ （内訳：回収水403億 $m^3$ 、淡水補給量107億 $m^3$ ）となり、近年では若干の減少傾向にある<sup>1)</sup>。また、工業用水の淡水使用量の内訳として、淡水補給量1965年から1970年前半まで増加したものの、その後、継続的に減少している。その反面、回収水の量が増加しており、すなわち回収率が飛躍的に上昇し、1965年の36.3%から2008年には79%となっている<sup>1)</sup>。

工業用水量（淡水補給量）のデータは、一般的に水源別（公共水道（工業用水道、上水道）、井戸水、その他の淡水、回収水）と、用途別（ボイラ用水、原料用水、製品処理用水及び洗じょう用水、冷却用水・温調用水、その他（飲料水、雑用水を含む））によって、工業統計表「用地・用水編」（従業者30人以上の統計）<sup>2)</sup> から入手することができ、さらに製造品出荷額等当たりの原単位を作成することもできる。さらに、同統計には海水の用水量も含まれているため、都道府県別及び業種別等によって海水利用の状況も分かる（ただし、ここでは河川への影響のみを考慮していることから海水における工業用水量は除外している）。

工業用水量（淡水補給量）は製造品出荷額等、使用水量原単位、回収率等を用いて式（3）のように推計する。

$$IW_i = \sum_j \sum_k IO_{i,j} \times \theta_{i,j,k} \times (1 - \mu_{i,j}) \quad (3)$$

$IW$ ：工業用水量（淡水補給量）、 $IO$ ：製造品出荷額等、 $\theta$ ：（淡水）使用水量原単位、 $\mu$ ：回収率、 $j$ ：グループ、 $k$ ：用途

本研究では、河川等から取水することで起きる流出等への影響を考察するため、回収水を除いた淡水補給量を工業用水として定義する。ただし、回収率が上がれば淡水使用量が増加した場合でも、新規の淡水補給量が減少するため（回収水が増える）、河川への影響は弱くなる可能性があり、このような技術進歩も考慮する。

製造品出荷額等の推計については、県内総生産及び産業構造の推計から得られる2次産業生産値との関係から推計する。そのため、出生率に伴う人口動態や経済成長の具合による県内総生産の推移、また一人当たり県内総生産から推計される産業構造によって2次産業生産値が変わり、これに伴い製造品出荷額等の値も変化する。

ここでは、シナリオとして、グループ構造と回収率を変化させる。グループの構造とは、基礎資材型グループ、加工組立型グループ、生活関連型グループの製造品出荷額等に占める比率のことであり、これが将来にかけて変化することになる。まず、BAUのシナリオは、2000年から2010年（実際の値は2009年）までは実績値を用いることとし、これ以降2050年まで2010年と同様の傾向が続くものとする。これに対し、例えば用水多消費型の産業を水価格や産業調整等によって出来る限り用水少消費型の産業に移行していくシナリオを設定し、とりわけ用水消費の少ない加工組立型グループのグループ比率が2050年に2010年の2倍まで増加するというシナリオを設定する。この他の2つのグループの比率は、加工組立型グループの増加分を全体から差し引いたものが、2010年のシェアのまま、2050年にかけて継続すると仮定した。

BAUの回収率のシナリオについては、2000年（実際の値は2002年）から2010年（実際の値は2009年）は実績値を、それ以降は2010年の傾向が継続すると仮定した。他方、回収率が変化するシナリオにおいては、2002年から2009年の回収率の実績をもとに、各県及びこれらのグループの回収率が継続して増減することとした。ただし当然であるが、回収率は1を越えないように設定している。全般的には、基礎資材型グループや生活関連型グループにおいて回収率が向上するシナリオとなっている。

## (6) 生活用水量の推計

生活用水は、家庭用水と都市活動用水に大別される。家庭用水は、一般家庭の飲料水、調理、洗濯、風呂、掃除、水洗トイレ、散水等に用いられる水である<sup>1)</sup>。都市活動用水は、飲食店、デパート、ホテル等の営業用水、事務所用水、公園の散水や公衆トイレ等に用いられる公共用水等が含まれる水である<sup>1)</sup>。ここでは、家庭用水と都市活動用水の双方を対象としている。

日本全体の生活用水量は、1989年の152.6億 $m^3$ から1997年には164.8億 $m^3$ まで増加し、その後、減少傾向に転じ2008年には154.5億 $m^3$ となっている。このような生活用水

量の推移は、生活用水原単位（生活用水使用量を給水人口で除した一人一日平均使用量（都市活動用水を含む））と大きく関わっており、1989年の308ℓ/人・日から1997年には324ℓ/人・日と上昇し、2008年には298ℓ/人・日に低下する。今後、この原単位がどのように推移していくのかによって、生活用水量の挙動が変わってくる。しかし、こうした生活用水原単位がどうなるのかを正確に予測することは難しい。この原単位は例えば家庭用水であれば所得、高齢化比率、水洗化率、気温等によって影響され、また都市活動用水であればこれらと合わせ自治体の歳出に直結する課税や景気動向等の影響に左右される。しかし、これらの動向を正確に推定することは難しいことから、ここでは1989年から2008年までの地域別<sup>付録6</sup>の生活用水原単位をもとに、2010年以降は2008年と変わらないものとするBAUのシナリオをベースラインとして設定する。さらに、これに加えて、同期間における各地域の最大値、最小値を選択するシナリオを採用する。

生活用水量は水道により供給される水の大半を占めているが、この総人口に対する水道の普及率は2009年において全国平均が96.6%に達しており、概ね100%に近い水準まで到達している。そのため、今後も給水人口はさらに増加すると考えられる。ここでは、2010年以降、2009年の実績を継続するBAUのシナリオに加え、将来的に水道普及率が100%にまで到達するシナリオを設定する。また、生活用水には有効水量ベース<sup>付録7</sup>と取水量ベースがあり、これらの差分は漏水等によるロスとなる。

これら人口、水道普及率、生活用水原単位、ロス率等を考慮すると、式(4)のように生活用水量を求めることができる。

$$DW_i = POP_i \times \lambda_i \times \delta_m \times \phi_m \quad (4)$$

DW：生活用水量（取水量ベース）、λ：水道普及率、δ：生活用水原単位（有効水量ベース）、φ：取水量/有効水量（取水率：1-取水率の逆数（すなわち有効率）はロス率となる）、m：地域

人口については、前節から推計される都道府県の値を用い、生活用水原単位は「平成23年版日本の水資源」<sup>1)</sup>の各地域別のデータを用いる。さらに、水道普及率は「社会生活統計指標-都道府県の指標-2012」<sup>2)</sup>のデータを用い、取水率は「平成23年版日本の水資源」<sup>1)</sup>の各地域別のデータを使用する。

### 3. パターン設定

ここでは、一つ目のパターン（パターン①）として人口や県内総生産値の成長率といった社会経済の条件と各セクターの条件をBAUのシナリオで設定する。次に、二つ目のパターン（パターン②）として出生率や経済成長率等の社会経済の条件を変化させる一方で、それ以外の各セクターのシナリオはBAUとする。さらに、三つ目のパターン（パターン③）として社会経済のシナリオはBAUに設定し、各セクターのシナリオを変化させる。最後に、四つ目のパターン（パターン④）として、パターン②とパターン③で得られた結果の中から、もっとも用水量が増加もしくは減少するシナリオの組み合わせを勘案し採用する。これによって、概ねパターン①のベースラインを基本としつつ、用水量が最大もしくは最小となるパターンが検討できる。

### 4. 推計結果

#### (1) パターン①の推計結果

パターン①は、社会経済条件及び各セクターの条件をBAUのシナリオで設定したものである。

出生率は2000年基準（全国平均値1.36）であり、県内総生産は1980年から2010年までのIMFの実質成長率のデータ<sup>2)</sup>から、1990年から2010年までの平均成長率0.928%を仮定し、これを中位の成長率のシナリオとしている<sup>9)</sup>。概ね、現在と社会・経済状況が変わらないシナリオである<sup>9)</sup>。農業用水のシナリオは、耕地面積については人口の推移によって変化する一方、農業用水原単位については現状と変わらないものと仮定した。工業用水のシナリオは、製造品出荷額等については、上記の社会経済及び産業構造に連動しているため、これらがBAUであれば出荷額等も現行の推移を継続する。グループ構造や回収率については現状と同様とした。生活用水のシナリオは、給水人口が出生率及び水道普及率によって決まるため、これが現状と同様の推移であればこれを継続する。水道の普及率については2009年の実績を継続し、さらに生活用水原単位は2008年のまま推移すると仮定した。

図-1に、日本全体におけるセクター別の用水量の推計結果を示す。この結果、全用水量は、2000年の824.19億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>から2050年の543.95億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>となり、およそ280.24億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>減少することが分かった。そのセクター別の内訳は、2000年の農業用水量542.97億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、工業用水量121.62億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、生活用水量159.60億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>から、2050年には農業用水量362.23億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、工業用水量66.05億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、生活用水量115.67億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>となり、それぞれ農業用水量180.74億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、工業用水量55.57億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>、生活用水量43.93億<sup>3)</sup>m<sup>3</sup>減少する結果となった。図-2に、

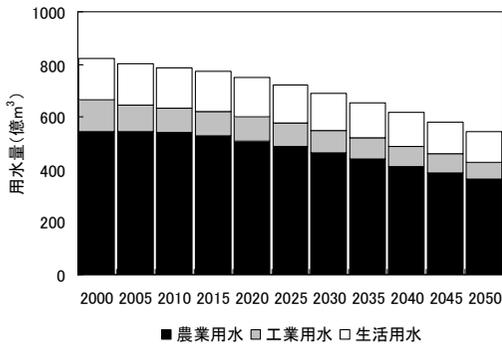


図-1 日本全体におけるセクター別の用水量の推計結果

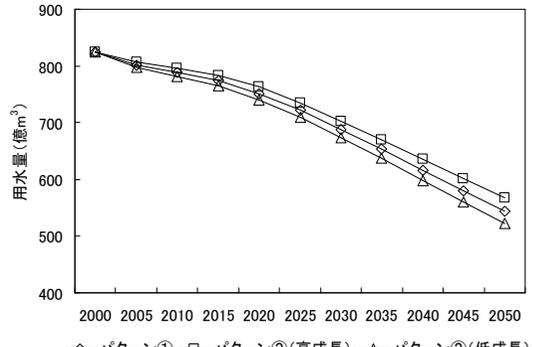


図-3 日本全体における社会経済シナリオごとの全用水量の推計結果

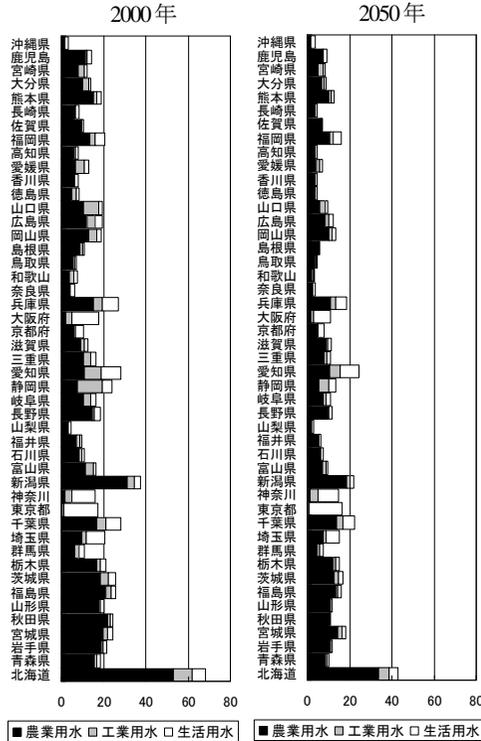


図-2 都道府県別セクター別の用水量の推計結果 (パターン①) 単位: 億m³

表-1 日本全体における社会経済シナリオ別セクター別の用水量の推計結果

	2000年	2050年		
		パターン①	パターン② (高成長)	パターン② (低成長)
農業用水量	542.97	362.23	381.85	345.67
工業用水量	121.62	66.05	62.49	65.17
生活用水量	159.60	115.67	123.13	110.79
全用水量	824.19	543.95	567.46	521.63

単位: 億m³

化させる一方で、各セクターの条件はBAUのシナリオのままに設定し用水量を推計する。

ここで、人口動態に関係する出生率及び県内生産の成長率については、それぞれBAUのシナリオより高くなる場合と低くなる場合が考えられる。ここでは、人口と経済の成長率が同様に変化するものと仮定し、双方ともにBAUより高くなる場合と低くなる場合を設定する。

高くなる場合の出生率は1990年レベル(全国平均値1.54)とし、県内総生産成長率はIMFの実質成長率のデータ<sup>24)</sup>をもとに、1980年から2010年までの平均成長率2.222%を仮定する<sup>9) 10)</sup>。他方、低くなる場合の出生率は昭和22年以降で最も少ない2005年レベル(全国平均値1.26)とし、県内総生産成長率はIMFの実質成長率のデータ<sup>24)</sup>をもとに、1980年から2010年までの平均成長率の内、マイナス成長を除く一番低い1993年の成長率0.171%を仮定する<sup>9) 10)</sup>。各セクターにおける諸条件は前節のBAUの場合と同様である。

図-3に、日本全体における社会経済シナリオごとの全用水量の推計結果を示す。この結果、パターン①では前節で示したように、全用水量は、2000年の824.19億m³から2050年の543.95億m³となる。パターン②の出生率や県内総生産成長率が高い場合では、2050年の全用水量が567.46億m³となり、パターン①と比較して23.51億m³多くなることが分かった。これに対して、パターン②の出生率や県内総生産成長率が低くなる場合は、2050年の全用水量が521.63億m³となり、パターン①と比較して22.32億m³、パターン②の高成長と比較して45.83億m³少なくな

都道府県別セクター別の用水量の推計結果を示す。都道府県別の用水量の結果を見ると、2000年では北海道68.26億m³、新潟県37.56億m³、愛知県28.36億m³、千葉県28.06億m³、兵庫県27.00億m³の順で用水量が多く、2050年では北海道42.92億m³、愛知県24.22億m³、千葉県22.32億m³、新潟県21.87億m³、兵庫県18.43億m³となる。これらの県の用水量が多い理由は、北海道では農業用水量と工業用水量が、新潟県では農業用水量が、愛知県では工業用水量と生活用水量が、千葉県や兵庫県では全てのセクターが他県と比較して順位が高いことがあげられる。

(2) パターン②の推計結果

パターン②では、社会経済条件をシナリオによって変

表-2 日本全体におけるシナリオ別の人間活動量の推計結果

	2000年	2050年		
		パターン①	パターン② (高成長)	パターン③ (低成長)
総人口(万人)	12,669.73	9,766.93	10,396.54	9,354.57
国内総生産(億円)	521.32	820.40	1,495.29	567.65
耕地面積(km <sup>2</sup> )	69,645.32	46,317.91	48,937.21	44,304.14
製造業出荷額等(億円)	236.98	182.23	174.47	179.03
給水人口(万人)	12,127.80	9,461.36	10,074.84	9,061.99

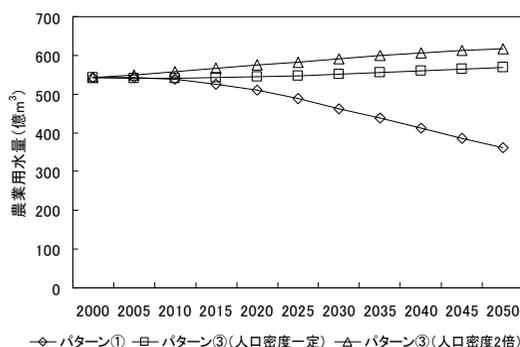


図-4 日本全体におけるシナリオ別の農業用水量の推計結果

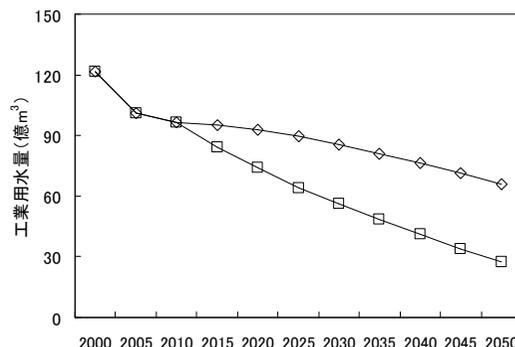


図-5 日本全体におけるシナリオ別の工業用水量の推計結果

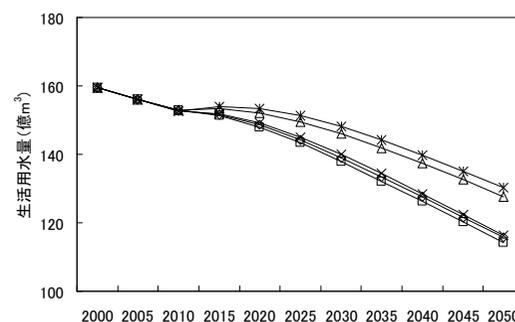


図-6 日本全体におけるシナリオ別の生活用水量の推計結果

ることが分かった。

表-1に、日本全体における社会経済シナリオ別セクター別の用水量の推計結果を示す。この結果、農業用水は人口に伴い変化するモデル構造となっているため、高成長の時はその値が高く、低成長の時には低くなっている。工業用水は産業構造によって変わってくることから、経済成長(一人当たりGDPの変化)が進み2次産業から3次産業にシフトすると用水量は低下する結果となっている。生活用水については、概ね人口と連動していることから人口の変化に伴い変化する。

また参考までに、表-2に日本全体におけるシナリオ別の人間活動量の推計結果を示す。

### (3) パターン③の推計結果

ここでは、前節とはシナリオの設定を変え、社会経済をBAUのシナリオで設定し、各セクターの要因をシナリオごとによって変化させる。農業用水量の推計では、人口密度(建物用地面積あたりの人口:ここでは、行政面積ではなく建物用地面積を用いている)を一定とした場合と人口密度をさらに集約し現状の2倍まで高とした場合において、人口減少に伴い削減された余剰の面積の半分を水田の耕地面積に置き換えることとした。またこの際、作付けの種類転換(水田面積の増加)によって農業用水原単位が変化する。工業用水量の推計ではグループ構造と回収率を変化させる。グループ構造では用水少消費型である加工組立型グループの比率が向上し、基

礎素材型グループや生活関連型グループでは回収率が向上する。生活用水量の推計では現状の水道普及率を100%まで上昇させた場合、さらにこれに生活用水原単位が最大と最小のシナリオを組み合わせるものとして設定する。

図-4に、日本全体におけるシナリオ別の農業用水量の推計結果を示す。この結果、パターン①すなわち社会経済及び各セクターがBAUのシナリオでは2000年の542.97億m<sup>3</sup>から2050年には362.23億m<sup>3</sup>と180.74億m<sup>3</sup>減少した。これに対し、パターン③の人口密度を一定にしたことによって人口減少に伴う余剰の面積を水田の耕地面積に転換

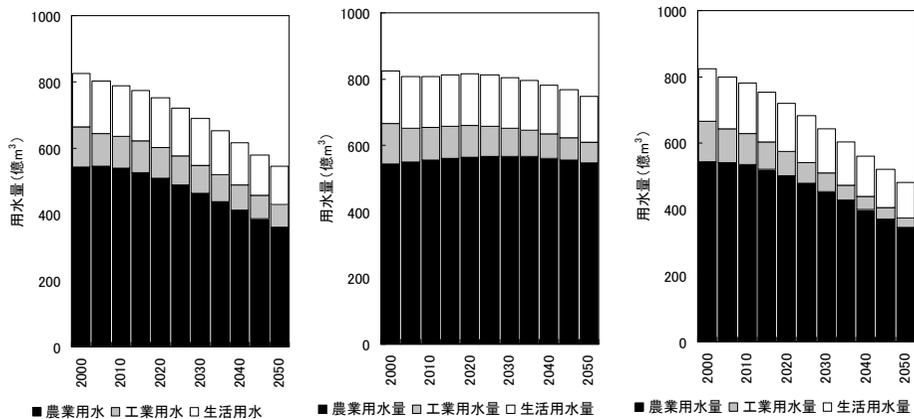


図-7 日本全体におけるパターン①(左), 最大(中), 最小(右)のセクター別用水量の推計結果

したため、2050年には用水量が569.07億 $m^3$ となり、26.10億 $m^3$ 増加した。また、人口密度を現状の2倍まで上昇させた場合は余剰面積がさらに発生し、これを水田に転換することから、2050年には617.31億 $m^3$ となり、74.34億 $m^3$ 増加した。

図-5に、日本全体におけるシナリオ別の工業用水量の推計結果を示す。この結果、パターン①のシナリオでは2000年の121.62億 $m^3$ から2050年には66.05億 $m^3$ と55.57億 $m^3$ 減少した。これに対し、パターン③の場合は、2050年に27.29億 $m^3$ となり、2000年からは94.33億 $m^3$ 減少した。

図-6に、日本全体におけるシナリオ別の生活業用水量の推計結果を示す。この結果、パターン①のシナリオでは2000年の159.60億 $m^3$ から115.67億 $m^3$ と43.93億 $m^3$ 減少した。また、パターン③の水道普及率が現状且つ1989年から2008年までの生活用水原単位の実績値の中から最小のものを選んだ場合では、パターン①すなわち水道普及率と生活用水原単位が現状のままの結果と比較して若干減少する結果となった。これは、生活用水原単位が現時点の実績値とほぼ変わらないため、さほど差が生じなかったと考えられる。さらに、パターン③の水道普及率が現状で原単位が最大となるシナリオの場合は、2050年において127.71億 $m^3$ となっており、2000年から31.89億 $m^3$ 減少した。パターン③の水道普及率が100%且つ原単位が最小となるシナリオの場合は、2050年において116.36億 $m^3$ となっており、2000年から43.24億 $m^3$ 減少した。パターン③の水道普及率が100%且つ原単位が最大となるシナリオの場合は、2050年において130.20億 $m^3$ となっており、2000年から29.40億 $m^3$ 減少した。

#### (4) パターン④の推計結果

ここでは、パターン②とパターン③から得られた結果を勘案し、用水量が最大ないしは最小となるシナリオの組み合わせを考える。ただし、ここでは全用水量が最大

ないしは最小になることを意味しており、各セクターにおいては異なる傾向があることを理解されたい。

パターン②から得られた用水量が最大となる社会経済のシナリオは、出生率や県内総生産成長率が高い場合であった。パターン③から得られた農業用水量が最大となるシナリオは人口密度(建物用地面積あたりの人口)を集約し現状の2倍まで高くした場合(人口減少に伴い減少した余剰の土地の半分を水田の耕地面積に置き換える)であった。また、工業用水量が最大となるシナリオは現状維持型であるBAUであった。さらに、生活用水量が最大となるシナリオは水道普及率が100%まで向上しさらに生活用水原単位が最大となる場合であった。対して、用水量が最小となるシナリオの組み合わせとしては、社会経済のシナリオが低成長の場合であり、さらに農業用水量がBAU、工業用水量はグループ構造と回収率が改善される場合、生活用水量が水道普及率の現状且つ原単位が最小となるものであった。

図-7に、日本全体におけるパターン①(ベースライン)、最大、最小のセクター別用水量の推計結果を示す。この結果、2000年の全用水量は824.19億 $m^3$ となっており、これが2050年のパターン①では543.95億 $m^3$ 、最大では748.45億 $m^3$ 、最小では481.91億 $m^3$ となった。セクターごとの内訳については、前節の傾向を参考にされたい。

図-8に、都道府県別におけるパターン①、最大、最小の全用水量の推計結果を示す。この結果、パターン①の場合、秋田県、和歌山県、山口県で水需要が大きく低下し、2000年と比較しておよそ半分以下となる。これに対して、沖縄県は微増となり、東京都や神奈川県では1割程度減少することとなった。水需要が最小の場合は、山口県、愛媛県、静岡県、秋田県、徳島県、島根県、宮崎県、和歌山県、青森県で6割ないし5割程度の減少となることが分かった。ただし、沖縄県の場合は微減となる。水需要が最大の場合は、東京都、神奈川県、北海道、沖

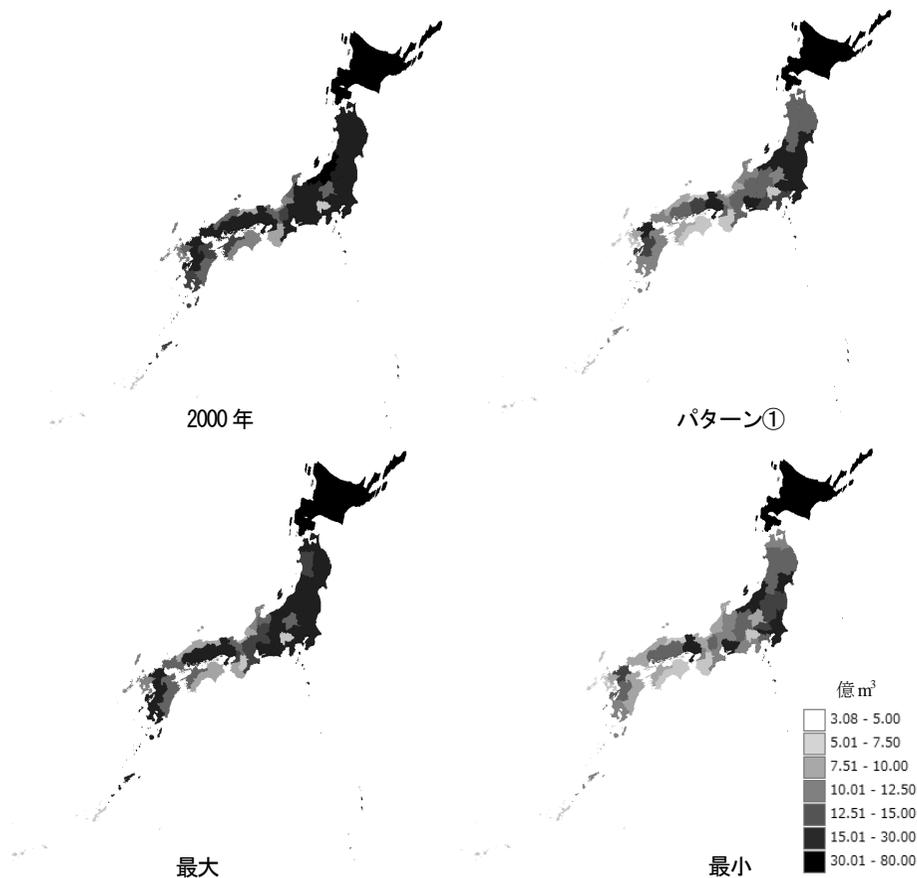


図-8 都道府県別におけるパターン①, 最大, 最小の全用水量の推計結果

※パターン①, 最大, 最小の推計結果は2050年の値である。

縄県, 鹿児島県, 山梨県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 長崎県, 滋賀県, 福岡県で水需要が増加することが分かった。それに対して, 山口県や秋田県では水需要は4割程度減少する。

今回設定したシナリオは, 人口密度を現在より2倍高くする等, コンパクトシティを想定しており, 比較的極端な社会経済像を反映した。しかし今後は, より現実的なシナリオを設定することによって, 具体的な将来像のもとでさらに検討を重ねていきたいと考えている。

## 5. おわりに

将来, 温暖化等の影響に伴い水資源量が不安定となり, さらに水利用の変化が河川流量等に影響を与える可能性がある。そのため本研究では, 各都道府県を対象に将来のセクター別(農業用水, 工業用水, 生活用水)の水需要を推計するシミュレーションモデルを構築した。ここ

では, 社会経済の状況や各セクターの動向等をシナリオとして設定することによって, 2000年から2050年までのセクター別の水需要を5年間隔で推計した。これによって, 人口減少や経済成長, またセクターごとの人間の活動量や原単位の推移等を, 将来的な用水量の増減の幅として検討することができた。こうした将来の水需要を知ることによって, 今後, 水不足や渇水が発生した場合の水需要のあり方を考えることができ, さらに河川の流量に与える影響を検討できると考えられる。

ただし, 今回作成したモデルは, データ不足やシナリオの設定等, 今後改善していく箇所が多く存在する。また, 将来的な水需要の推移と共に, 図-9のような水資源の状況を加味する必要がある。特に, 温暖化の影響等による水資源量の変化の推計と, この水供給と水需要のバランスを今後は考察していきたいと考えている。さらに, 水不足や渇水は局所的な地域と特定の季節に発生するものであり, 現状のような県単位や年単位の推計では精度が粗すぎるため, これらの状況を正確に表わすことはで

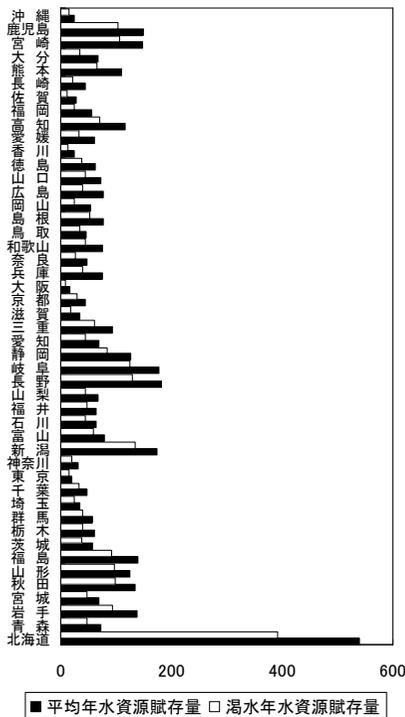


図9 都道府県における水資源賦存量 単位：億<sup>3</sup>

※基データは平成 23 年版日本の水資源<sup>1)</sup>である。平均年水資源賦存量とは 1976～2005 年までの 30 年間の平均値である。渇水年水資源賦存量も同期間のデータを用いており、降水量の少ない方から数えて 3 番目の年における水資源賦存量である<sup>1)</sup>。

きない。そのため今後は、推計精度を上げるためにも、時間・空間単位をさらに細分化することによって、より詳細な検討を進めていきたい。

## 付録

- 1) 田とは、湿田・乾田・沼田・蓮田及び田である<sup>2)</sup>。
- 2) その他の農用地とは、麦・陸稲・野菜・草地・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぜ・こうぞ・しゅろ等を栽培する土地である<sup>2)</sup>。
- 3) 工業用水には、公益事業（電気事業、ガス事業及び熱供給事業）において使用された水量を含んでいない<sup>1)</sup>。
- 4) 取水量ベースとは、河川水、地下水等の水源から取水された段階の水量を意味する。
- 5) 工業統計調査（用地・用水編）は、従業者30人以上の事業所について、工業用水に関する調査項目を集計したものである。
- 6) 各地域の区分は次の通りである。北海道には北海道のみが、東北には青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、新潟県が、関東内陸には茨城県、栃木県、群馬県、山梨県が、関東臨海には埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県が、中部には

長野県、岐阜県、静岡県、愛知県、三重県が、北陸には富山県、石川県、福井県が、近畿内陸には滋賀県、京都府、奈良県が、近畿臨海には大阪府、兵庫県、和歌山県が、中国山陰には鳥取県、島根県が、中国山陽には岡山県、広島県、山口県が、四国には徳島県、香川県、愛媛県、高知県が、北九州には福岡県、佐賀県、長崎県、大分県が、南九州には熊本県、宮崎県、鹿児島県が、沖縄には沖縄県が含まれる<sup>1)</sup>。

- 7) 有効水量ベースとは、水道による給水のうち、漏水等によるロスを除いて、需要者において有効に受け取った段階の水量のことを意味する<sup>1)</sup>。

## 参考文献

- 1) 国土交通省水資源部水資源計画課総合水資源管理戦略室，日本の水資源（平成 23 年版），<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/index5.html>.
- 2) 都道府県における長期水需給計画策定状況：[http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/d\\_plan/table01.html](http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/d_plan/table01.html).
- 3) 多田智和，土屋修一：気候変動による降水特性変化がもたらす水需給バランスへの影響検討，地球環境シンポジウム講演集，Vol. 16，pp.137-142，2008.
- 4) 大坂谷吉行，青山剛：システムダイナミックモデルによる都市成長と水需給の関連分析，日本建築学会技術報告集，Vol. 23，pp.409-414，2006.
- 5) 大坂谷吉行，青山剛：二度の渇水を経験した福岡市の都市成長と水需給の関連分析，日本建築学会技術報告集，Vol. 23，pp.421-426，2006.
- 6) 勝谷雄三：松山市の水事情－長期的水需給計画の策定について－，雨水資源化システム学会誌，Vol. 10，No. 2，pp.33-34，2005.
- 7) Onishi, A., Okuoka, K., Shi, F. and Morisugi, M.: Construction of a Simulation Model for Future Scenario Analysis of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions in Japanese Prefectures, *Ecodesign2011 -Design for innovation value towards a sustainable society-*, Springer, pp.838-843, 2011.
- 8) 大西暁生，奥岡桂次郎，石峰，森杉雅史：都道府県別における低炭素社会実現のための政策評価ツールの作成，環境科学会 2011 年会，pp.81，2011.
- 9) 大西暁生，奥岡桂次郎，高島健志，石峰，森杉雅史：低炭素社会を目指す都道府県別 CO<sub>2</sub> 排出量の将来推計モデルの開発，環境システム研究論文発表会講演集，Vol.39，pp.425-436，2011.
- 10) 大西暁生，河村直幸，奥岡桂次郎，石峰，谷川寛樹：全国都道府県における都市構造物マテリアルストック需要量の将来シナリオ分析，土木学会論文集 G（環境），地球環境研究論文集，2012（印刷中）。
- 11) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」，平成 12 年国勢調査：<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/index.htm>.
- 12) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」，平成 13 年度人口動態統計特殊報告：[http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?\\_toGL08020103\\_&listID=000001049181&disp=Other&requestSender=search](http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000001049181&disp=Other&requestSender=search).

- 13) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」, 平成 18 年度人口動態統計特殊報告: [http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?\\_toGL08020103\\_&listID=000001046785&requestSender=search](http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000001046785&requestSender=search).
- 14) 厚生労働省, 平成 21 年人口動態統計の年間推計: <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikai09/index.html>.
- 15) 厚生労働省, 第 20 回生命表: <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/20th/index.html>.
- 16) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」, 都道府県, 男女別出生児数及び死亡者数: <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001026128>.
- 17) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」, 平成 17 年国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm>.
- 18) 内閣府, 県民経済計算: <http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/sonota/kenmin/kekka/h19/main.html>.
- 19) 国際協力銀行: 中国北部水資源問題の実情と課題－黄河流域における水需給の分析－, JBIC Research Paper, 28, 2004.
- 20) 大西暁生, 井村秀文, 白川博章, 韓驥: 黄河流域水資源需給の時間・空間構造の把握に関する研究, 環境システム研究論文集 34, pp. 611-622, 2006.
- 21) 国土交通省国土数値情報ダウンロードサービス, 国土数値情報土地利用 3 次メッシュデータ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-a.html>.
- 22) 経済産業省, 工業統計調査(用地・用水編), <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2.html>.
- 23) 総務省政府統計の総合窓口「e-Stat」, 社会生活統計指標－都道府県の指標－2012, <http://www.stat.go.jp/data/ssds/5.htm>.
- 24) International Monetary Fund (IMF), World Economic and Financial Surveys: World Economic Outlook Database, <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2010/02/weodata/index.aspx>.

(2012. 7. 18 受付)

## A FUNDAMENTAL STUDY ON CONSTRUCTION OF WATER DEMAND MODEL FOR JAPANESE PREFECTURES

Akio ONISHI, Yoshinobu SATO, Keijiro OKUOKA,  
Feng SHI and Masafumi MORISUGI

In this study, we constructed a simulation model for future water demand in each prefecture of Japan. This model was constructed by using published statistical data and information derived from the geographical information system (GIS). The model can estimate water demand in three different sectors (agriculture, industry, and domestic) from 2000 to 2050 (the simulation time step is 5 years) for different socio-economic scenarios and with the introduction of water-saving technologies. The water demand for different scenarios is estimated by considering changes in population, economic situation, area of cultivated land, population with access to a water supply, water recycling in industrial processes, among other factors. In the BAU scenario, the results show that Japan's total water demand will be 54 billion m<sup>3</sup> in 2050, down from 82 billion m<sup>3</sup> in 2000. An understanding of future water demand using this model could help in a re-evaluation of appropriate water use, thus avoiding water shortages as well as allowing for an examination of the influence on river flows.